

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

碩士論文

基於 Maxband 模型之連鎖交通號誌改善策略

A Coordination Control Strategy Based on Maxband Model for
Signalized Intersections in Arterial Systems

研究生：柯景祥

指導教授：簡榮宏 教授

中華民國 102 年 11 月

基於 Maxband 模型之連鎖交通號誌改善策略

A Coordination Control Strategy Based on Maxband Model for
Signalized Intersections in Arterial Systems

研究生：柯景祥

Student : Jing-Siang Ke

指導教授：簡榮宏

Advisor : Rong-Hong Jan



國立交通大學
資訊科學與工程研究所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Computer Science and Engineering
College of Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Computer Science

November 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 102 年 11 月

基於 Maxband 模型之連鎖交通號誌改善策略

研究生：柯景祥

指導教授：簡榮宏 博士

國立交通大學資訊科學與工程研究所

摘 要

近年來，經濟快速發展除了帶動許多都市開發，並提高人民的交通代步工具持有，該現象可能產生交通壅塞效應，尤其在人口相對較多的都市區域更為嚴重，因此，如何運用現有科技如大眾智慧運輸系統 (Intelligent Transportation System, ITS) 改善交通號誌現有問題，成為相關研究重要的課題之一。為求有效紓解交通壅塞，交通號誌控制方法由獨立路口為始發展，持續演進如幹道與路網連鎖性交通號誌控制，以降低各路口平均車輛延滯時間、車輛停等次數，提升其服務水準。先前交通號誌控制方法為利用歷史車流相關資訊作號誌規劃，然而交通狀況變化快速，此種方式難以反應實際車流變化，在先進感測與通訊網路結合下，使得能夠即時根據車流量等相關資訊即時的進行交通號誌控制。

本研究將以幹道連鎖性交通號誌控制為基礎，藉由車輛感測器與通訊設施監測取得各路口流量資訊，並以此針對各路口車輛延滯影響程度分析決定是否延長現行燈號，以達最小平均延滯時間。

關鍵字：交通壅塞、交通號誌、幹道系統。

A Coordination Control Strategy Based on Maxband Model for Signalized Intersections in Arterial Systems

Student : Jing-Siang Ke

Advisor : Dr. Rong-Hong Jan

INSTITUTE OF COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING
NATIONAL CHIAO TUNG UNIVERSITY

Abstract

Due to economic development and urbanization, traffic congestion has become a serious problem in urban environments. Therefore, combining the advanced traffic management systems and the advanced technologies (e.g., Intelligent Transportation System, ITS) would raise the value in traffic signal control.

In this thesis, we propose a coordination control strategy for signalized intersections in arterial systems. By collecting traffic information from vehicle sensors and roadside detectors, we jointly consider how the above factors impact to the delay of ordinary vehicles. Simulation results show that our system can significantly reduce total waiting time and stopping times.

Keywords: Traffic congestion, Traffic signal, Arterial systems ◦

誌謝

我要特別感謝指導教授簡榮宏博士，老師在生活上適時地給予關懷，在課業以及研究上指導皆使學生受益良多。同時感謝口試委員交通大學資訊學院王國禎教授、陳健教授以及屏東教育大學資訊工程所王朱福教授對本論文不吝給予指正與建議，使得本論文能夠更加地完善。

兩年的碩士班生涯中，感謝計算機網路實驗室的學長(安凱、家瑋、嘉泰、鈺翔、曰慈、唯義、慈麟、紹閔)、同學(和家、秉琨、瑋劭)、學弟妹(宜靜、岱旻、易聖、柏青)在課業與生活的互助、關心與歡笑。

最後我要感謝我的家人以及期間陪伴的朋友，感謝你們的付出、關懷以及鼓勵，讓我能夠堅持下去並完成人生重要的里程碑之一。

國立交通大學資訊科學與工程研究所 柯景祥 謹誌

2013年11月

Contents

第一章、 緒論	1
第二章、 交通號誌控制方法	4
2.1 獨立路口控制	4
2.2 幹道控制	8
2.3 路網控制	11
2.4 小結	13
第三章、 幹道續進延長策略	14
3.1 問題描述	14
3.2 系統架構	15
3.3 連鎖號誌改進策略	17
第四章、 模型建置與模擬	24
4.1 模擬環境	24
4.2 效能分析與模擬結果	25
第五章、 結論與未來展望	30
5.1 結論	30
5.2 未來展望	30
參考文獻	31

圖目錄

圖一. 週期長度與延遲間敏感度示意圖.....	4
圖二. 未連鎖號誌系統 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖.....	9
圖三. 連鎖號誌系統 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖.....	9
圖四. SCOOT 系統架構圖.....	11
圖五. SCATS 系統架構圖.....	12
圖六. 交通號誌控制方法之分類.....	13
圖七. 最大綠燈帶寬延長可能性示意圖 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖.....	15
圖八. 路段架構圖.....	16
圖九. 幹道整體系統架構圖.....	16
圖十. 連鎖幹道規劃 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖.....	17
圖十一. 下行綠燈帶寬圖 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖.....	17
圖十二. 綠燈延長帶寬對應圖.....	18
圖十三. 幹道直接延長下行帶寬與上行綠燈帶寬衝突示意圖.....	18
圖十四. 紅燈時間與最小紅燈時間示意圖.....	19
圖十五. 相鄰路口決定其可供延長時間.....	19
圖十六. 單一車輛因延長帶寬受益示意圖.....	20
圖十七. 下行車流因延長帶寬總受益示意圖.....	20
圖十八. 雙向車流於延長帶寬獲益示意圖.....	21
圖十九. 車輛因延長綠燈帶寬產生延滯示意圖.....	22
圖二十. 同向車輛於延長帶寬懲罰示意圖.....	22
圖二十一. 雙向車流於延長帶寬懲罰示意圖.....	23
圖二十二. 模擬路口數 (a) 三個連續路口 (b) 四個連續路口 (c) 五個連續路口.....	24

圖二十三. 模擬環境部分參數設置.....	24
圖二十四. 三個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間.....	26
圖二十五. 四個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間.....	26
圖二十六. 五個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間.....	27
圖二十七. 四個路口之主幹道車輛平均延滯時間.....	28
圖二十八. 四個路口之次幹道車輛平均延滯時間.....	29
圖二十九. 四個連續路口之整體車輛平均停等次數.....	29



第一章、緒論

隨著智慧型運輸系統 (intelligent transportation systems, ITS)[1] 的發展,以通訊和感測系統可獲得更多即時性資訊,進而發展如先進交通管理系統 (Advanced Traffic Management System, ATMS) 之應用。交通號誌控制為 ITS 中重要的課題,最理想的路網狀態為所有車流依據最高速限行駛,但基於安全性考量,實際上必須於交叉路口進行車流管控,相關議題已有許多相關的研究[2][3],依幾何特性可將交通號誌控制分為單一路口控制、幹道路口控制到路網控制,即點線面三種控制方式。隨著求解目標及其規模大小,複雜度與規劃時間也隨之增加[4],而其常見最佳化目標可分為兩大類[5]:最大續進帶寬模式以及最小延滯模式。所謂最大續進帶寬模式為車輛在規劃時間區間內,能夠依照預定車速通行多個連續路口,降低其通行多個路口間之停等次數;最小延滯模式則考慮如何指定適當週期長度以及分配時向比例,最小化車輛在路口之間平均停等的時間長度,其中,時向決定那些車道具有通行權,當路口同一時向再次出現稱之為一個週期,號誌一般以週期作為循環,週期內包含多個時向。

獨立路口控制已有許多研究[6][7][8]可使得車流於交叉路口有效率且安全通過,盡可能以最小化延滯為目標,傳統上其策略建置方式是以歷史資料進行離線型規劃,其後由交控中心人員依據監視系統等方式了解真實路網並視需求調整號誌規劃,而隨著前述智慧型運輸系統的發展,使得交通管理人員或是交通號誌系統能夠透過各式車輛偵測器取得更完整且即時的車流資訊作更精準的決策。

但因為獨立路口的控制方法未考慮與相鄰路口之間影響,使得車流有可能無法通行連續路口,車輛可能必須在多個路口之間反覆的減速與加速,產生頻繁走停的現象對於駕駛者來說並非為理想服務品質,且加減速行為直接影響後方車輛速度,將同時使得車流停留路網之時間將相對增長,因此進一步研究開始探討關於連鎖性

號誌控制方式，即考慮相鄰路口的交通號誌控制策略，如幹道控制與路網控制，相關問題也持續發展並成為許多研究的目標[9]。

文獻[10]研究指出，一般而言，續進帶寬模式之號誌規劃較延滯模式為佳，也就是對於整個路網將之分解為許多幹道的集合是較好的求解方式，實際上，目前許多連鎖號誌控制研究中多以切割子網路方式作為規劃方式，接著從子網路挑選出不產生迴圈之幹道進行規劃，分別求解各個子網路之交通號誌時制規劃後，再將其結果合併並依據績效值修正結果。

續進帶寬求解方式主要趨勢為整合性求解法，即各路口先行規劃單一路口號誌，如此使其先能達到該路口的績效指標，通常為延滯時間，接著依據綠燈續進帶寬模型所需參數，要求各路口之間的距離、號誌偏移量、旅行時間等相關資訊作連鎖號誌之帶寬規劃，此種方式考慮各路口最小延滯目標，並使幹道能夠得到最大綠燈帶寬。由於實際車流的隨機分佈狀況，側向道路所需綠燈時間可能較預先規劃之號誌來得短，此時可考慮將側向道路部分時間作為增加最大綠燈帶寬額度，本研究將以幹道號誌控制為基礎，以不增加幹道整體延滯之進行延長策略規劃。

根據前述相關研究之建議，本研究將以幹道連鎖號誌控制模型為基礎，此為根據各路口之前的距離、車速、號誌相關參數規劃最大續進帶寬的求解方法。並以模擬軟體 Synchro[11]尋找綠燈帶寬以及 Netlogo[12]進行模擬，視實際路網狀況決定是否延長以有效紓解交通壅塞：

1. 解決獨立路口控制策略的相關問題。
2. 以最大帶寬模式作為基礎進行改善，使幹道能盡可能延長綠燈帶寬，使車流獲得更高的續進能力。
3. 結合 ITS 發展一即時性交通號誌控制系統以反應實際路網狀況。

本論文可分為下列五個部分：第一章說明本研究之背景、動機、目的與研究流程。第二章針對國內外相關研究，進行號誌規劃之文獻回顧，介紹各類型交通號誌

控制策略主要方法，針對上述問題選擇本研究將採行的控制策略，並以此為基礎進行連鎖號誌策略改善。第三章將論述本系統詳細架構與研究方法，以不影響幹道整體延滯時間前提，考慮相關路口之側向道路，決定是否延長綠燈帶寬。第四章將第三章所提出之研究方法，使用軟體進行路網模擬，環境設定將以三至五個路口各以離峰、平時、尖峰三種流量呈現。第五章根據第四章之模擬結果分析，並根據本研究之後可能遇到的問題，對未來研究提出建議以及可能持續發展之方向。



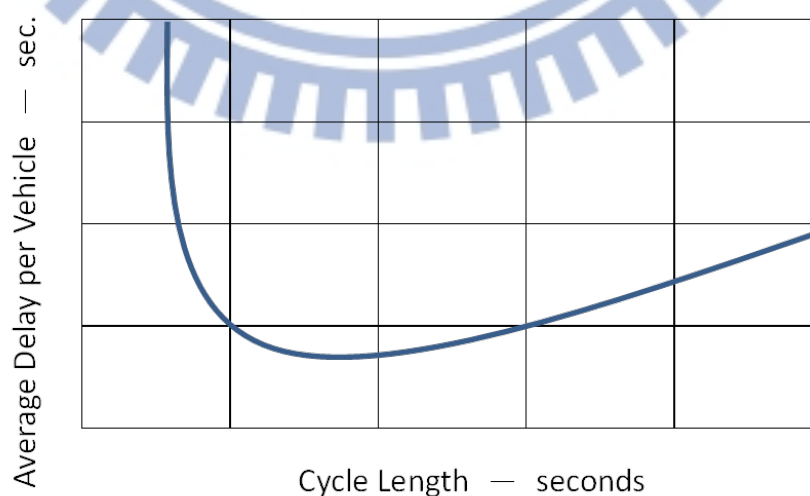
第二章、交通號誌控制方法

下面介紹三種主要號誌控制常見方法，根據幾何特性分為獨立路口、幹道以及路網，即點、線以及面三種策略，並提出所欲解決之問題和其一般解決方法。

2.1 獨立路口控制

對於獨立路口控制策略，主要目標是藉由最佳化號誌週期，合理分配各時向綠燈時間與其順序，使車流在交叉路口最小化延滯時間。

圖一為週期長度與車輛平均延滯示意圖[5]，當路口同一時向重複出現之間的時間長度稱為一個週期，週期內包含多個時向。當給予較短之週期長度，車輛平均延滯時間會巨幅成長，主要原因為週期長度無法消化該路口的車流輛，部分車輛必須等待下一個或是更多的號誌週期而產生大幅度的延滯時間；當給予較長之週期長度，意味著各時向有更充裕的時間供車流通過，車輛非常有機會於一個週期內通行，但若高估時間，則可能產生雖然時向中部分的時間沒有車流通行之現象，其餘時向依然必須等待該時向結束，而產生車輛延滯。因此在獨立路口號誌規劃上，如何決定合適的週期為其目標之一。



圖一. 週期長度與延遲間敏感度示意圖

接下來介紹兩種常見的週期決定方法。

理想上最短號誌週期時間 C_m 為：

$$C_m = L + \frac{q_1}{s} C_m + \frac{q_2}{s} C_m + \dots + \frac{q_n}{s} C_m \quad (2.1)$$

其中 L 為週期中所損失時間，通常為黃燈時間與交叉路口清空車輛用的全紅燈時間； $\frac{q_n}{s}$ 為第 n 個時向所屬車道之中的最高臨界流量比值， q_n 為時向 n 的最高流量， s 則為該路口的飽和流量，飽和流量決定方式為該路口連續綠燈可通行的車流量。因此：

$$C_m = L + C_m(y_1 + y_2 + \dots + y_n) \quad (2.2)$$

$$= L + C_m Y \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow C_m = \frac{L}{1-Y} \quad (2.4)$$

(2.4)式子重要假設之一該路口未達飽和狀態，因此其中的變數 Y 不能等於或超過1。而該式另一假設條件為車輛服從均勻分配，而實際車流可能帶有隨機分配的部分，Webster[13][14]觀察發現大部分最佳週期較接近：

$$C_o = \frac{2L}{1-Y} F \quad (2.5)$$

其中 F 為一受車流與飽和流量比例以及週期損失時間影響之調整係數，Webster 同時對其進行迴歸分析得漸進式 2.6 較符合大部分狀態之週期長度，其中 $K = 1.5$ 。

$$C_o = \frac{KL+5}{1-Y} \quad (2.6)$$

而另一決定週期的方法為美國公路容量手冊 (Highway Capacity Manual, HCM)[15][16]，其針對 Webster 公式在車流接近飽和流量時，會高估週期時間的部分進行改善，HCM 其決定週期長度公式為：

$$C_o = \frac{L}{1 - \frac{\min(CS, RS)}{RS}} \quad (2.7)$$

其中 C_o 為週期長度； L 為週期中損失時間；通常為黃燈或全紅時間； CS 為個時向的臨界流量(veh/h)； RS 為參考流量 $RS = 1710 \times PHF \times f_a$ ，其中 PHF 為尖峰小時流量，其計算方式為： $PHF = \frac{\text{尖峰小時流量}}{4 \times (\text{尖峰小時最大 15 分鐘之流量})}$ ， f_a 為區域調整係數，當為市區時該值為 0.9，否則該值為 1。

1. 前述為兩種常見號誌週期規劃方法，當求解出週期長度之後，接著需決定綠燈時間，若為固定號誌規劃，可依據流量分配其有效綠燈時間：

$$G_n = (C_o - L) \frac{y_n}{Y} \quad (2.8)$$

其中 G_n 為時向 n 所分配獲得的綠燈時間； C_o 為規劃之週期長度； L 為週期損失時間，通常為黃燈或全紅時間； y_n 為時向 n 最高臨界流量比值； $Y = \sum_{i=1}^n y_i$ 。除了分配各時向綠燈長度之外，並可能利用改變時向順序進一步增加該路口的效率[17]。

2. 若該獨立路口為觸動式號誌控制，即環境中具備車輛感測裝置，可根據車流資訊動態延長號誌時間，則需決定最短以及最長綠燈時間以作為延長號誌範圍之依據，主要為求解三個常見變數，分別為行人步行斑馬線時段、清空車輛佇列最短綠燈時段以及最長綠燈時段，以下對這三項變數進行介紹。

(1) 行人步行斑馬線時段：

$$G_{ped} = \begin{cases} t_{start_up} + \frac{L}{S_p} + 0.81(N_{ped}/W_E), & W_E > 3.0m \\ t_{start_up} + \frac{L}{S_p} + 0.27N_{ped} & , W_E \leq 3.0m \end{cases} \quad (2.9)$$

其中 t_{start_up} 為行人起步反應時間，通常設定為 3.2 秒； L 為斑馬線行走長度； S_p 為行人步行速度； N_{ped} 為每一單位的觀察時間內通過的行人數量； W_E 為斑馬線寬度。由此公式預估行人步行所需時間長度。

(2) 清空車輛最短綠燈時段：

$$G_{cmin} = t_{start_up} + 2 * n \quad (2.10)$$

其中 G_{cmin} 為預估清空靜止車輛所需花費時間； t_{start_up} 為駕駛反應時間，通常設定為 2 秒；2為假定車距時間； n 為靜止車輛數目。

(3) 最長綠燈時段：

在求解完最佳化週期之後，各時向依據最高臨界值 y_i 所佔總合 $Y = \sum y_i$ 之間的比例作為該時向的綠燈長度，並可以將該值 1.25 至 1.5 倍[18]定為該時向最長綠燈時間 G_{max} 。

求解完三個相關變數之後，則該路口可決定：

$$\text{最短綠燈時間為 } G_{min} = \max\{G_{ped}, \min\{G_{cmin}, G_{max}\}\} \quad (2.11)$$

$$\text{最長綠燈時間為 } G_{max} = \max\{G_{ped}, G_{cmin}, G_{max}\} \quad (2.12)$$

若相關裝置在設定的時限內感測到車輛，則系統可以在最長綠燈時間原則之內延長綠燈時間。

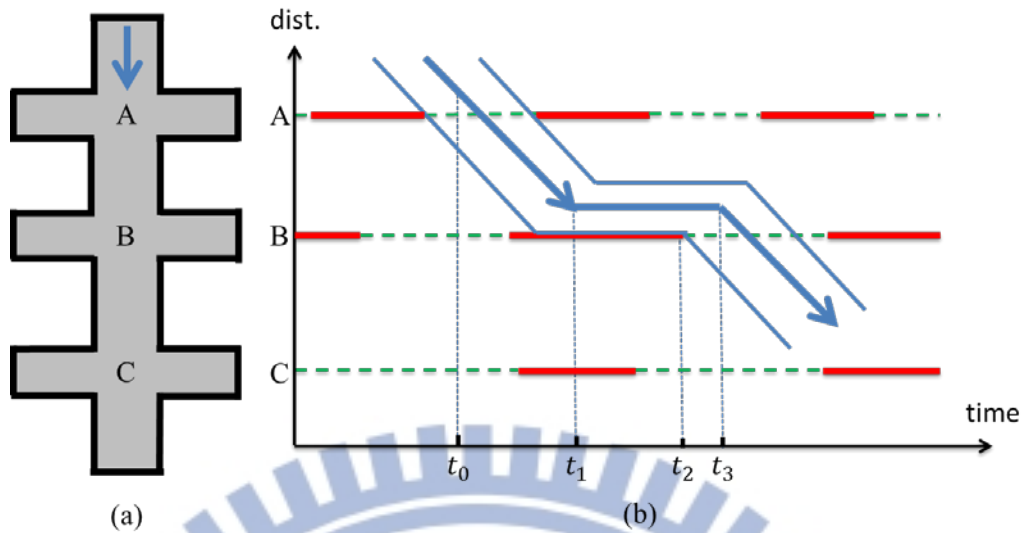
2.2 幹道控制

在獨立路口的號誌規劃上，各時向根據最佳化週期以及其車流量分配相對應之綠燈時間，但是由於缺少與相鄰路口之間的考量，使得車輛有可能通過當前路口後，在下一個路口必須停留一段時間。

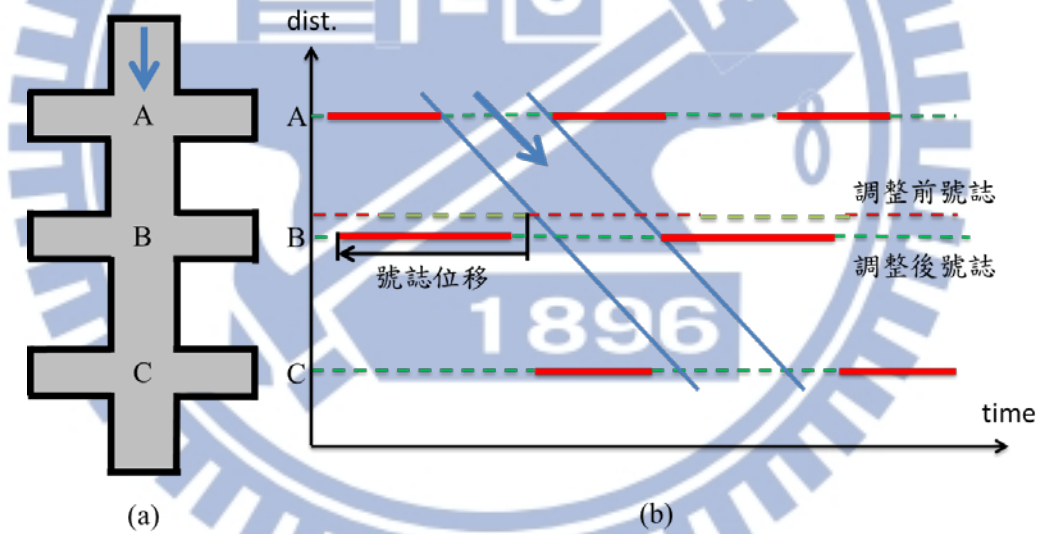
圖二為一未施行連鎖號誌系統，圖二(a)為該幹道之路網圖，幹道上有A,B,C三個路口，箭頭代表觀察之車流方向，圖二(b)為該系統號誌時空對應圖，橫軸對應整個系統持續時間，而縱軸對應圖二(a)主幹道距離，並在三個路口對應位置的以實現與虛線代表其號誌規劃，其中實線為紅燈號誌、虛線為綠燈號誌，紅綠燈之一次循環為一完整週期。

為了簡化說明起見，我們此處只考慮一個幹道方向之車流。當有一車輛進入此幹道準備由A路口至C路口此方向行駛，並在 t_0 時間被感測到，根據圖二(b)號誌規劃，該車可由A路口順利通行至B路口，但在時間點 t_1 ，將因為B路口紅燈號誌關係必須停等一段時間，直到B路口於 t_2 恢復綠燈號誌，此時該車前方車輛將開始陸續清空，直到 t_3 該車輛可以繼續依既定方向前行。

由於該幹道沒有進行連鎖號誌規劃，使得上或下行車流於B路口產生了一段停留時間 t_1 至 t_3 ，該車輛在時間內並無朝其目標方向持續前進，然而藉由連鎖規劃將相鄰路口號誌作時向位移調整，是有可能消除此種車流停滯現象。以圖三為例，系統將B路口作號誌規劃的平移調整之後，如圖三(b)所示，則上下行車流即消除了原本應該停留在B路口之現象，減少了車輛停等次數，並同時消除了車輛停滯時間。



圖二. 未連鎖號誌系統 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖



圖三. 連鎖號誌系統 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖

續進帶寬模式[19][20][21][22][23][24]為一幹道連鎖號誌系統，其挑選或為連鎖路口決定共同週期，依據上下游各路口之間的車輛旅行時間以及號誌相對關係，調整幹道各路口號誌進而產生最大綠燈帶寬，使車輛可於該段規劃時間內連續通行多個路口。這類的問題，我們稱為最大續進帶寬 (MAXimal BANDwidth, 簡稱Maxband)，下式為其數學模型：

$$\text{Max } b = \bar{b}, \text{ subject to} \quad (2.13)$$

$$w_i + b \leq 1 - r_i$$

$$\bar{w}_i + b \leq 1 - \bar{r}_i$$

$$\begin{aligned} t_i + \bar{t}_i + (\bar{w}_i + w_i) - (\bar{w}_{i+1} + w_{i+1}) + \Delta_i - \Delta_{i+1} \\ = -0.5 * (\bar{r}_i + r_i) + 0.5 * (\bar{r}_{i+1} + r_{i+1}) + (\bar{t}_i + \tau_{i+1}) + m_i \end{aligned}$$

$$b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i \geq 0, i = 1, \dots, n, m_i = \text{integer}$$

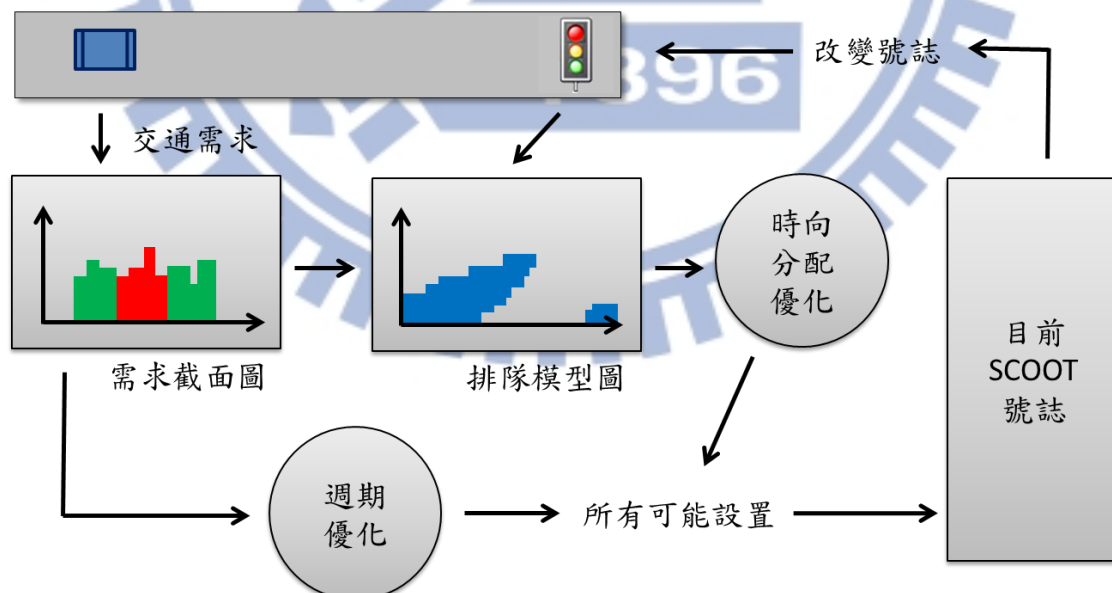
各個路口皆有兩個方向的變數，其式目標為求解幹道上路口的雙向綠燈帶寬，已知變數為： t_i, \bar{t}_i 為相鄰路口旅行時間， r_i, \bar{r}_i 為規劃之紅燈時間， Δ_i 為幹道上該路口雙向的紅燈偏移時間。求解變數為： b, \bar{b} 為綠燈帶寬時間， w_i, \bar{w}_i 為帶寬之外的綠燈時間， m_i 則為來回幹道一次所經歷的週期時間。以上皆以週期作為時間單位。而如何規劃連鎖的幹道範圍，文獻[23]則建議三至五個號誌可得到較佳續進帶寬。

2.3 路網控制

由高度相關的路口作為一個系統控制，最常見的方法是將整體路網切割成子路網，然後將子路網之間的計畫作逐步調整，以達到最佳化目標。

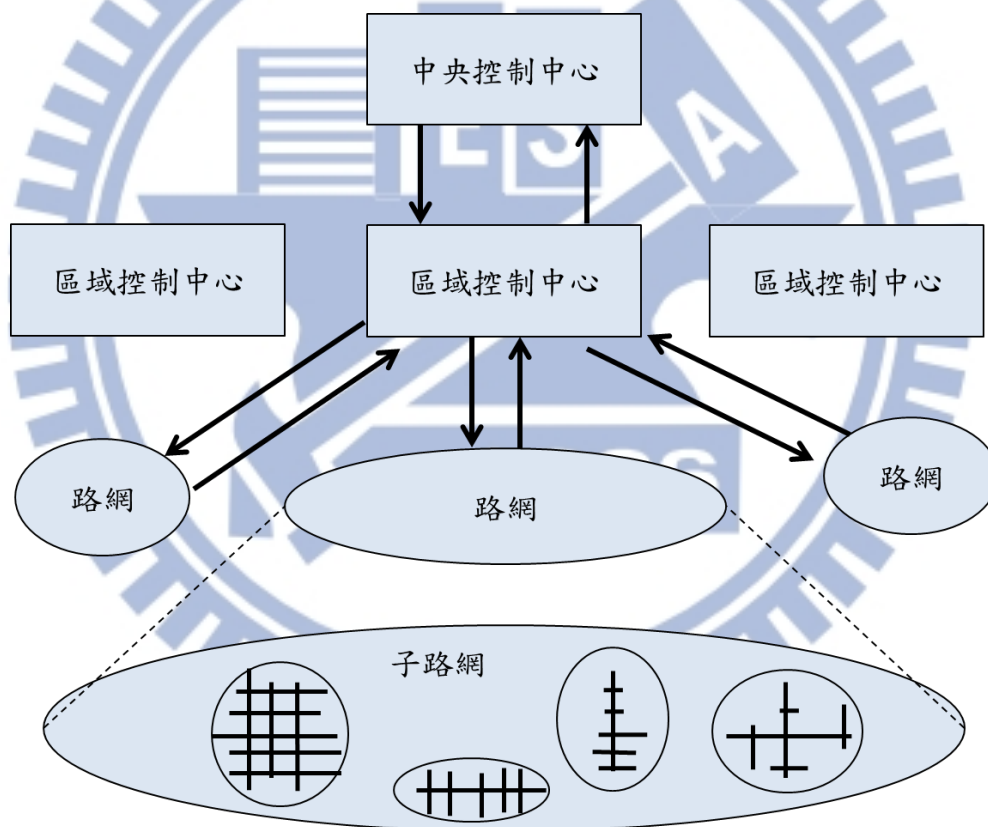
1. 循環補償優化系統 SCOOT (Split-Cycle-Offset. Optimization Technique)

[25][26][27]，該系統架構如圖五所示，其為英國運輸部與民間公司共同發展之適應性系統。該系統於路網中各路段停止線以及其上游一定距離佈設車輛感測器，並根據車流量以 2.5 分鐘至 5 分鐘為一單位，將感測資訊統計出各車段的需求流量，依此決定優化週期，每次調整量上限為 4 秒；並根據感測器之資訊提供系統分析排隊模型決定各時向分配比例；同時根據各相鄰路口擁擠程度考慮所有可能時向配置，最後選擇改變的號誌規劃，下一循環重複上述步驟進行適應性調整。





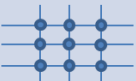
圖四. SCOOT 系統架構圖

2. 以澳洲新南威爾士州道路交通局研究開發的商用交通號誌軟體－雪梨自適應式協調系統 (The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System, 簡稱 SCATS) [28][29][30]舉例來說，圖四為其系統架構圖，SCATS 為三層的號誌系統，第一層為中央監控與管理電腦；第二層為區域電腦，約可控制 120 個路口；第三層則為路口控制器，約可控制 1 至 10 個路口。SCATS 運行時，第三層控制器本身會保存一定數量不同時向比例或是不同週期之規劃，並根據自訂績效，通常為鄰近路段飽和度平衡，作為號誌規劃目標選擇。



圖五. SCATS 系統架構圖

2.4 小結

	幾何特性	規畫時間	常見模型
獨立路口		快速 (離線/時向)	Adaptive[17]
連鎖幹道		中等 (離線/時向)	Maxband[20]
路網控制		慢 (離線/週期)	SCOOT[29] SCATS[31]

圖六. 交通號誌控制方法之分類

圖六為三種號誌控制方法整理，由於路網系統複雜度與規劃時間隨著規模範圍增加，許多實務應用與學術研究經常以切割路網的方式處理路網控制[3][9][31]，因此問題最後回歸至獨立路口以及幹道控制的問題。

本篇論文主要是針對幹道連鎖號誌控制為基礎，結合車輛感測裝置提供之資訊，即時地改變號誌規劃以反應實際車流狀況。

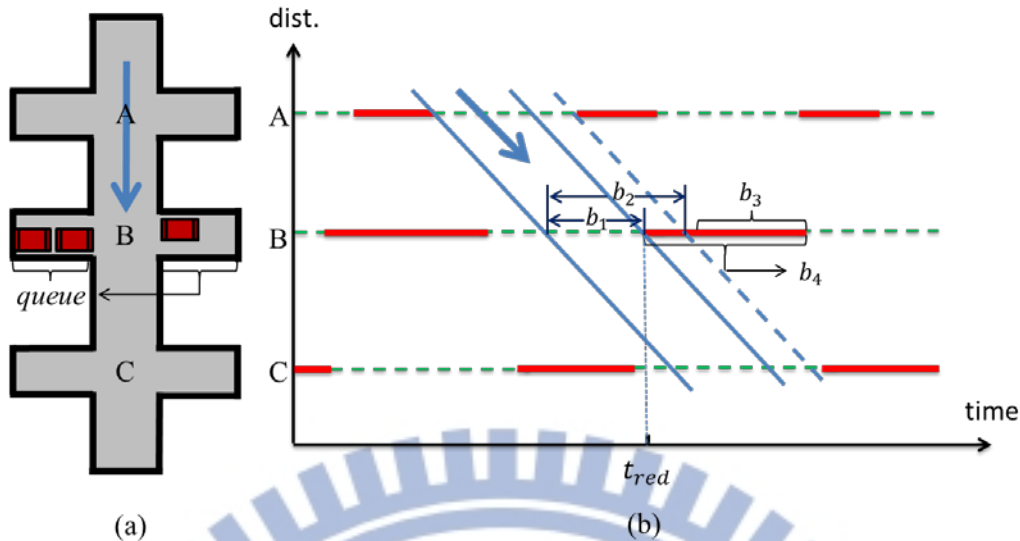
第三章、幹道續進延長策略

以下針對本研究所實施之連鎖號誌控制策略加以說明，主要有兩個項目，分別為『決定延長時間長度』以及藉由感測裝置提供之車流資訊『判斷是否施行延長策略』。3.1 節將描述本研究所處理的問題；3.2 節將介紹本研究實施該號誌策略所需的系統架構；3.3 節為本研究在連鎖號誌之改進策略。

3.1 問題描述

一般對於幹道的定義為擁有快速且便捷的公路，依幾何結構來看為一帶狀的連鎖路口，具備紓解道路壅塞的功能。實現幹道連鎖號誌控制策略之一為 Maxband[19] 模型，其方法為各個相鄰路口先依據歷史車流資訊規劃自身的號誌，模型挑選相同週期長度之路口號誌，以最大化雙向綠燈帶寬作為最佳化的目標，調整各個路口的號誌時序，期預定綠燈帶寬能夠週期出現，使車流在帶寬時間內能通行規劃之連續路口，降低車輛延滯時間與停等次數。

但由於幹道號誌為預先規劃，實際車流所需時間可能與預定號誌時間有所差異，如圖七為例，以 B 路口來說，其主幹道綠燈帶寬即將於 t_{red} 時間點結束，假設號誌將會給予 B 路口側向等待車輛通行權，但經由感測裝置預估，側向道路路口清空車輛只需要綠燈時間為 b_3 ，而幹道上之預定紅燈時間(即側向道路綠燈時間)為 b_4 ，其中 $b_4 > b_3$ ，如果我們將預定紅燈時間由 b_4 縮短為 b_3 ，則原來的最大帶寬 b_1 將變大為 b_2 (如圖七所示)。因此本論文擬利用車輛感測裝置為基礎，建置一交通號誌系統收集的道路系統相關車流資訊，即時反應車流狀況，並以最小化幹道總延滯時間為目標，考慮是否延長主幹道綠燈帶寬，使得車輛能進一步降低延滯時間。

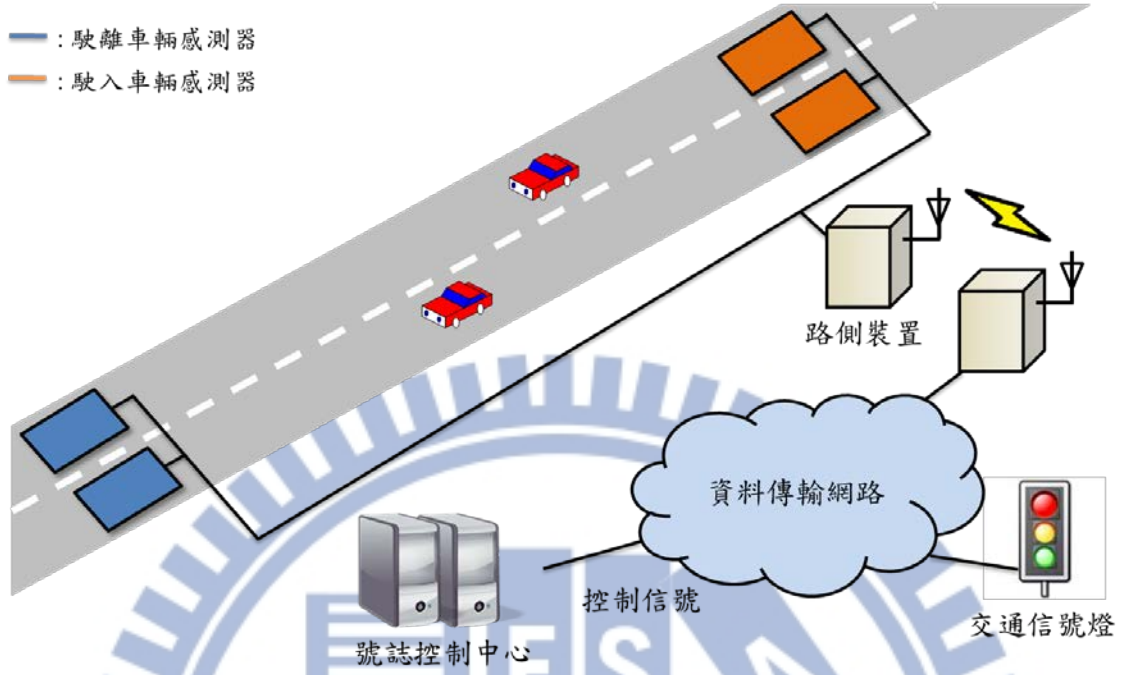


圖七. 最大綠燈帶寬延長可能性示意圖 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖

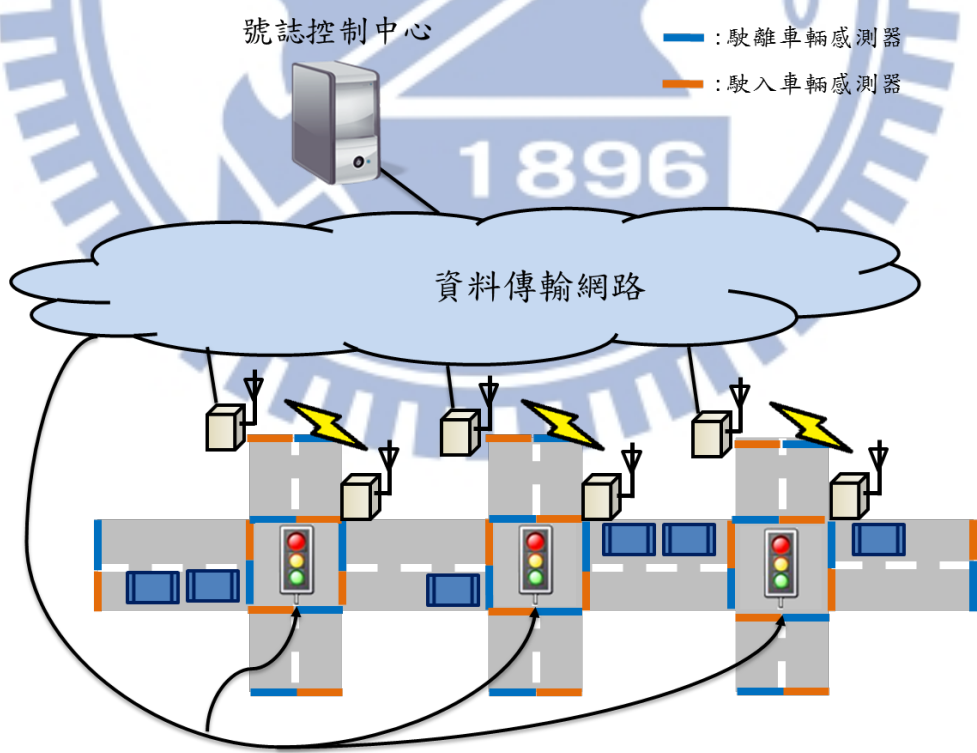
3.2 系統架構

本研究系統架構採用中央控制方式。以圖八為例，前端由設置於路段的車輛感測裝置主動收集路網車流資料並提供給路側裝置，其提供資料通常依據感測狀態設置位元參數，若無車輛通過則以 0 表示，反之則以 1 表示，路側裝置依據感測裝置提供的資料，以頻率分析其車流速度，並以感測數量分析該路段車輛數目；隨後路側裝置將其整理之資訊(如車流速度、車流數量…等)回報後端控制中心，號誌控制系統將利用相關資訊作號誌規劃。

而由於本系統為幹道連鎖號誌系統，因此決策所需資訊涵蓋多個相鄰路口，其系統整體架構如圖九所示，我們在預定控制的幹道所有路段上裝設相關感測裝置，同時各個路口皆設有路側裝置以整理其相鄰路段感測器提供之車流資料，若路口需進行綠燈延長策略，號誌控制中心會依各路口提供之資訊進行規劃，並將決策結果的控制信號傳回所有控制路口之交通信號燈。



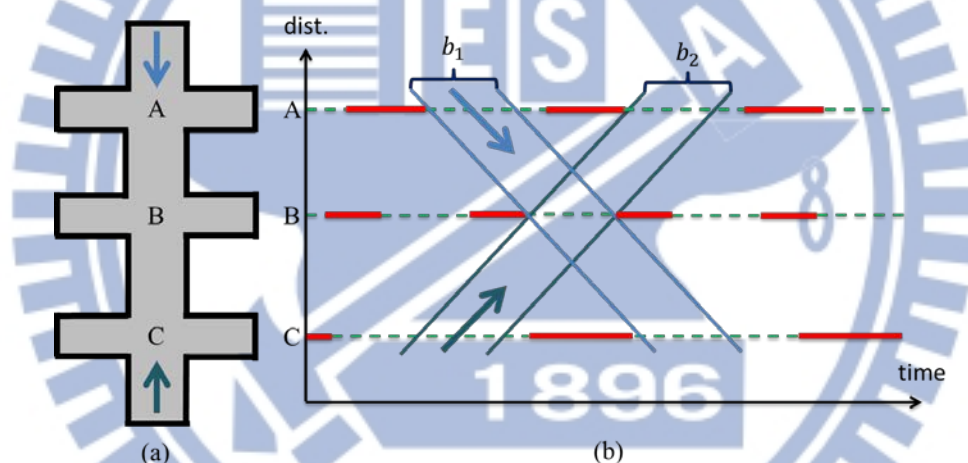
圖八. 路段架構圖



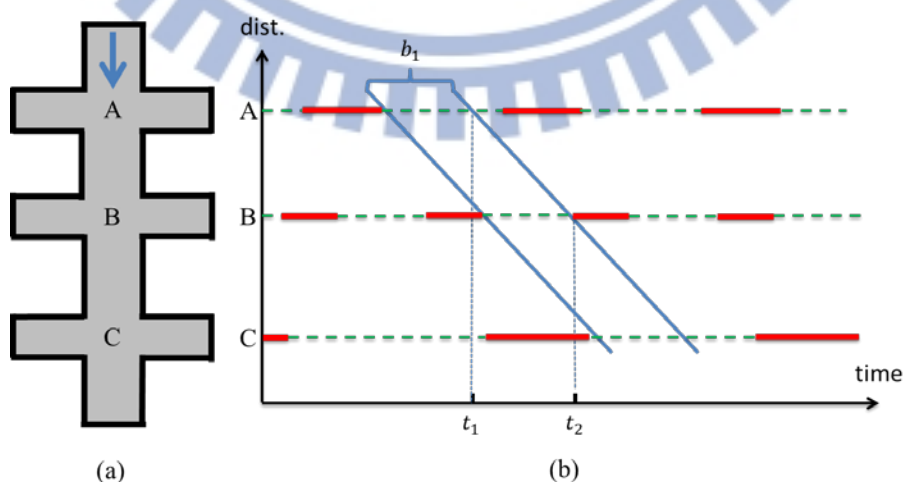
圖九. 幹道整體系統架構圖

3.3 連鎖號誌改進策略

當幹道號誌經由 Maxband 模式運算後，形成連鎖控制，其號誌之時空圖將會產生雙向最大綠燈帶寬，如圖十所示，若主幹道方向為下行(上行)方向，其具有下行(上行)帶寬 b_1 (b_2)，上下行車流可以在綠燈時間內連續通過 A、B、C 三個連續路口，然而如 3.1 小節所述，我們可以視實際車流狀況，適當地改變號誌規劃，使得幹道系統有機會因為延長綠燈帶寬獲得效益。在決定是否延長綠燈帶寬之前，我們先計算綠燈帶寬時間之可延長的長度，而後藉由感測裝置預估所有受延長時間影響之車輛是否為幹道整體帶來效益，為了簡化說明起見，我們之後將主要以單一車流方向說明，如圖十一所示。



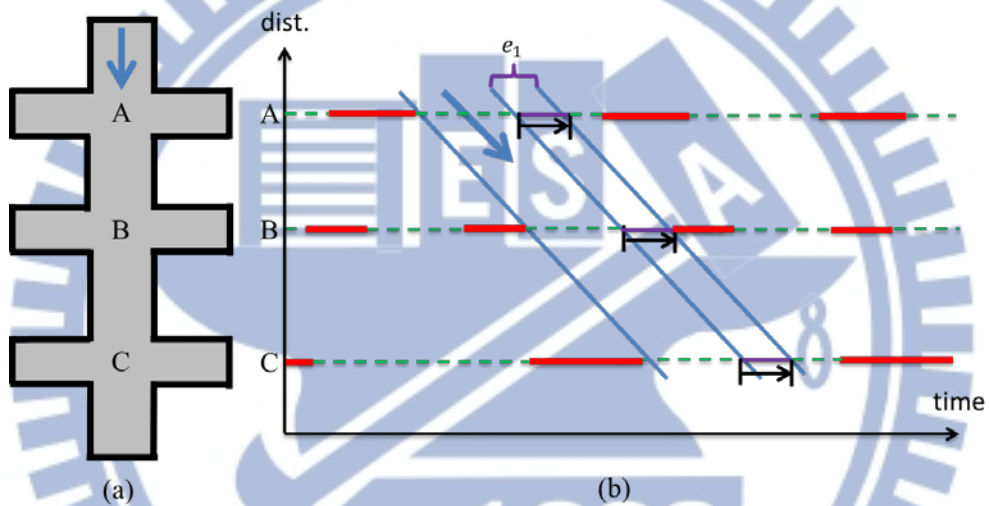
圖十. 連鎖幹道規劃 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖



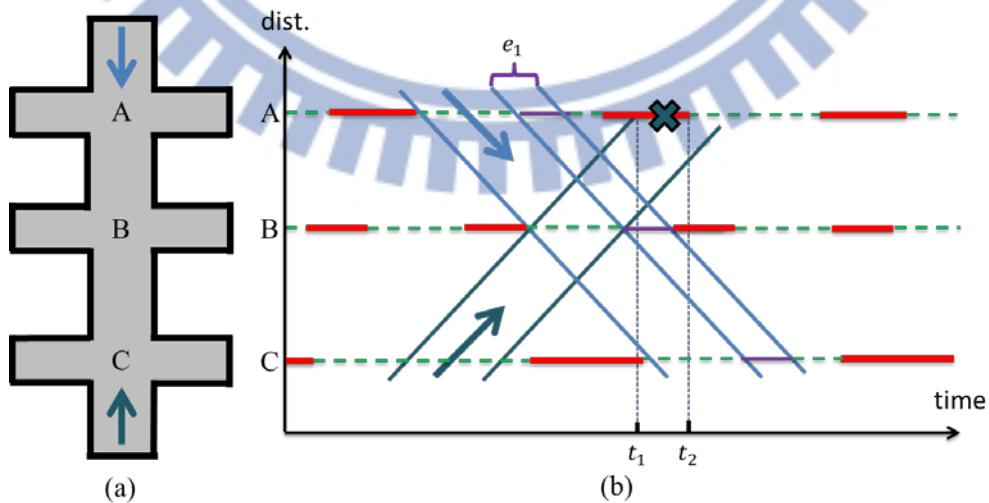
圖十一. 下行綠燈帶寬圖 (a) 幹道路網圖 (b) 號誌時空對應圖

1. 最長可延長綠燈帶寬時間

在考慮延長策略的時間點，我們選擇以各路口之綠燈帶寬結束之際進行判斷，以圖十一的 A 路口為例，其決策時間點即為 t_1 ，而 B 路口則為 t_2 。但若我們直接將所有路口延長一段綠燈時間 e_1 ，此時該幹道號誌規劃將隨之平移改變如圖十二(b) 所示；此時，若我們將原來的上行綠燈帶寬加入考慮，將可以發現此綠燈帶寬延長方式間接使得另一車流方向喪失了綠燈帶寬(即影響到原規劃的上行帶寬 b_2)，以圖十三為例，因下行車流直接延長綠燈帶寬，使得上行車流失去 $t_2 - t_1$ 的綠燈帶寬。



圖十二. 綠燈延長帶寬對應圖

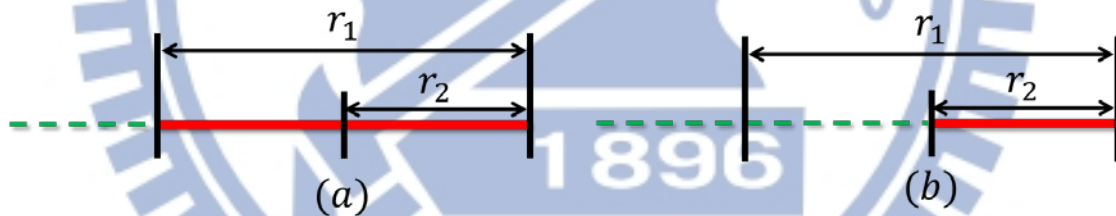


圖十三. 幹道直接延長下行帶寬與上行綠燈帶寬衝突示意圖

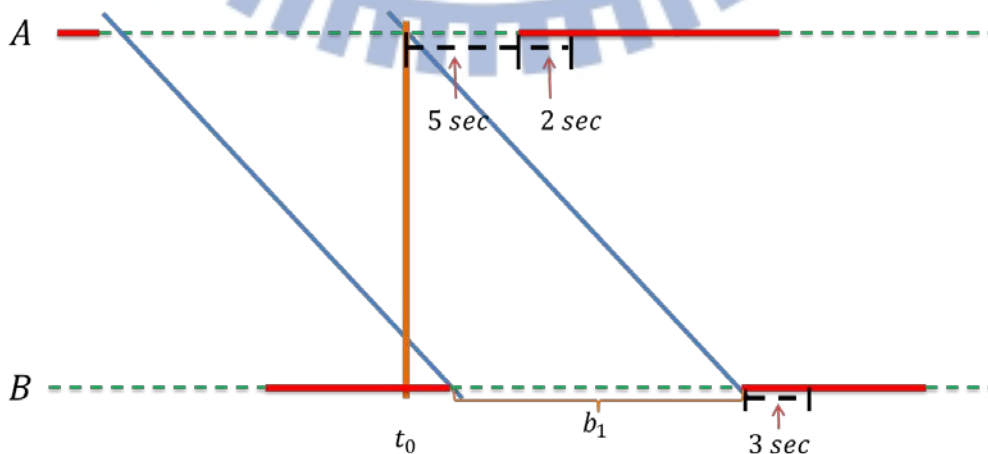
因此本研究中的延長時間，將以幹道是否有可供利用之紅燈時間進行考慮，如此可不改變整體預定號誌規劃，同時延長綠燈帶寬。依照系統架構，我們可以依收集到車流資訊以及式子(2.10)預估紅燈路段的停等車輛所需清空時間 G_{cmin} ，另外以式子(2.9)事先預估行人穿越馬路之最短時間 G_{ped} ，進一步決定紅燈最小時間：

$$r_2 = \max\{G_{cmin}, G_{ped}\}$$

如圖十四(a)所示，其預定紅燈時間為 r_1 ，而 r_2 為實際紅燈所需時間，則其之間的差值 $\max\{r_1 - r_2, 0\}$ ，即為路口最大可延長綠燈帶寬時間，其延長綠燈帶寬過後之號誌規劃如圖十四(b)所示。以圖十五為例，A路口綠燈帶寬即將結束，此時我們要求A路口及其下游B路口計算各自可供延長時間，此處A路口包含剩餘的綠燈時間5秒鐘，可供延長時間2秒鐘，總共為7秒，而B路口沒有剩餘綠燈時間，可供延長時間為3秒鐘；在各路口計算出各自可供延長時間之後，共同決定一個各路口皆可延長的時間長度，以此例來說為3秒鐘。



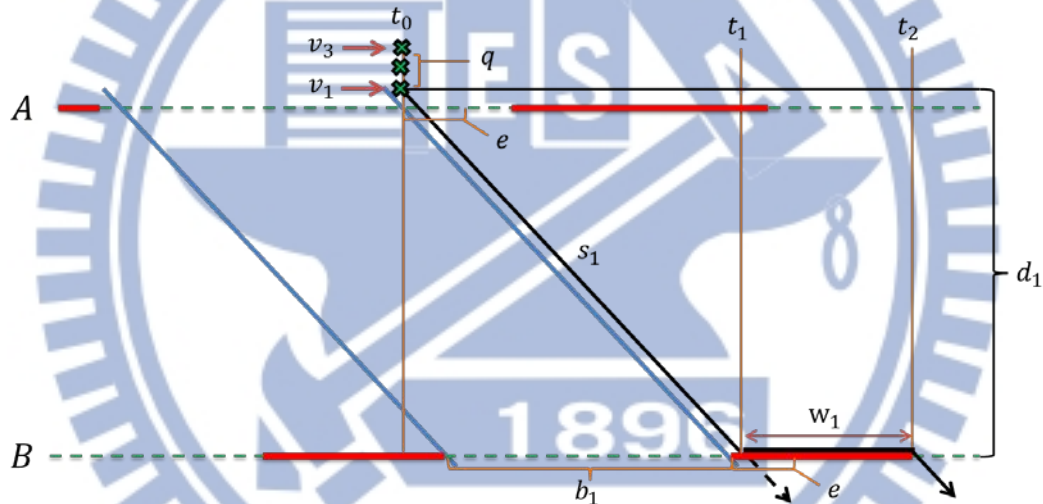
圖十四. 紅燈時間與最小紅燈時間示意圖



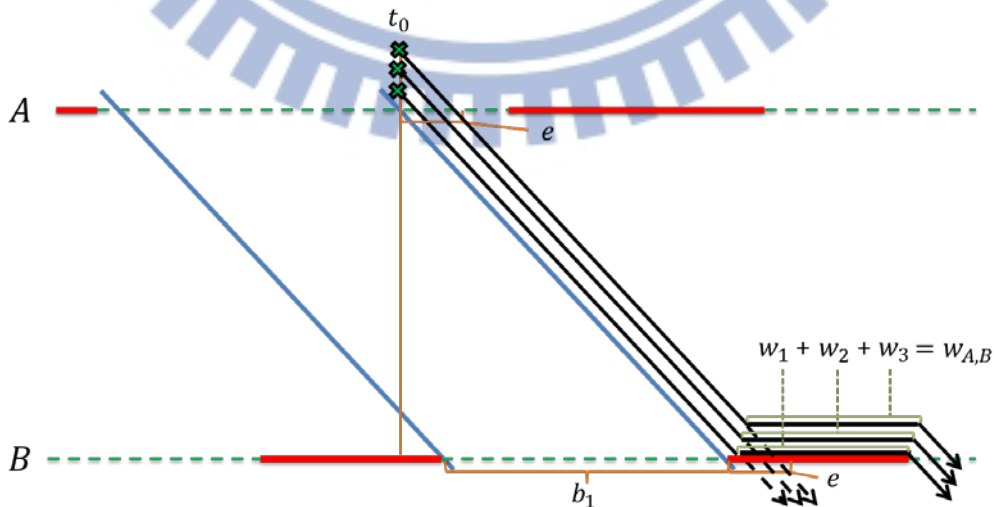
圖十五. 相鄰路口決定其可供延長時間

2. 延長策略

在各路口共同決定可延長時間之後，可以依此進行幹道整體的效益評估。首先為計算獲益值，以圖十六下行綠燈帶寬為例，在決策時間點 t_0 根據感測裝置得知此時有一車輛 v_1 將 A 路口並不因紅燈停留，則可依據車流速度 s_1 與距離 d_1 推估該車旅行時間 $\frac{d_1}{s_1}$ ，否則除了推估旅行時間，我們需根據式子(2.10)額外考慮前方 q 輛車輛之清空時間 G_{cmin} ；此例 v_1 將於 t_1 通過 B 路口，因 t_1 落於延長時段 e 之內，所以該車為受益車輛，否則該車必須停等至 t_2 才能獲得通行權繼續前進，其獲益值為 w_1 ；以圖十七為例，對於這些同向獲益車輛(v_1, v_2 與 v_3)，我們可累計其所有同向車輛之受益值為 $w_{A,B}$ ， $w_{A,B} = w_1 + w_2 + w_3$ ，其中 w_i 為車輛 i 的受益值。

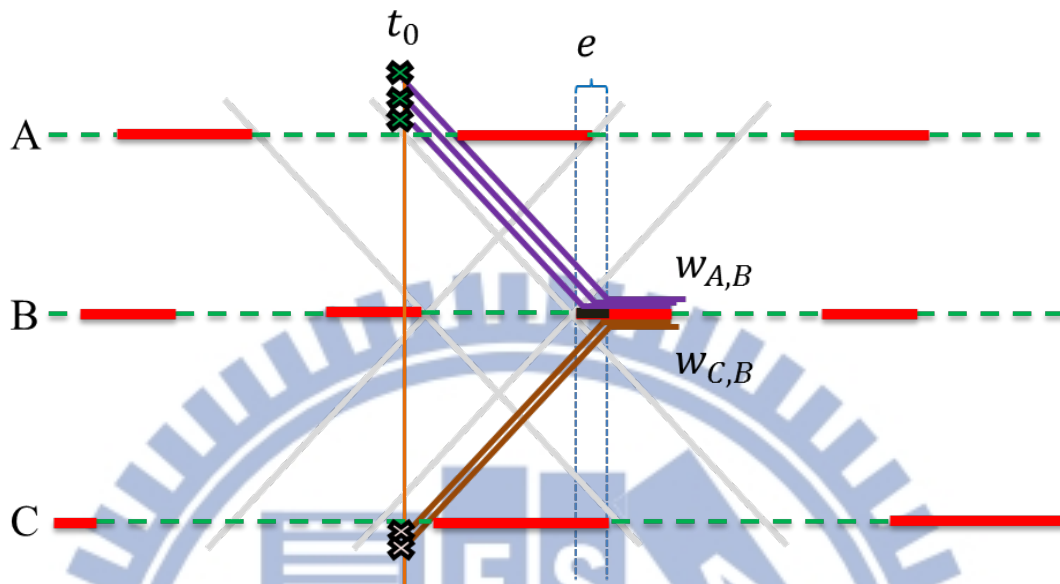


圖十六. 單一車輛因延長帶寬受益示意圖



圖十七. 下行車流因延長帶寬總受益示意圖

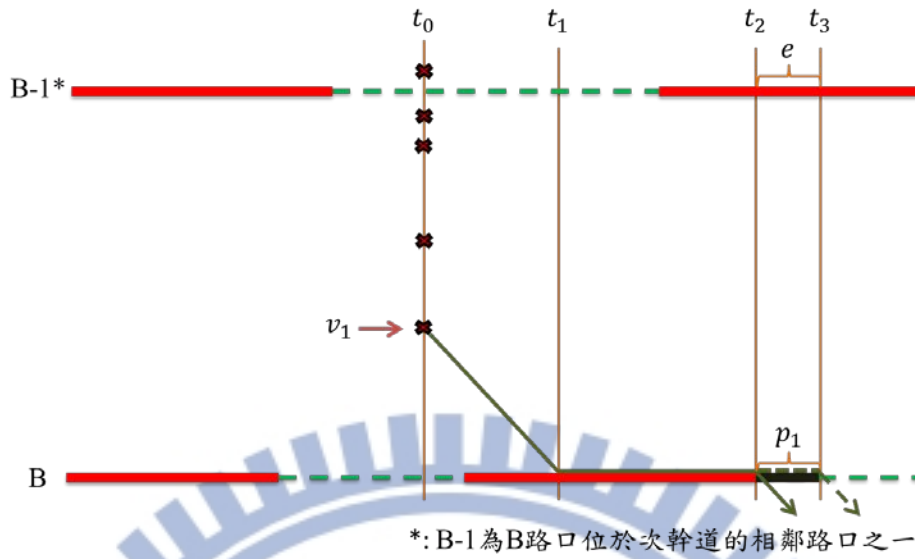
因主幹道為雙向通行，上行車流也將因延長綠燈帶寬獲得效益 $w_{C,B}$ ，將兩方向效益值加總即為其延長策略下的總體效益值 $TW = w_{A,B} + w_{C,B}$ （如圖十八所示）。



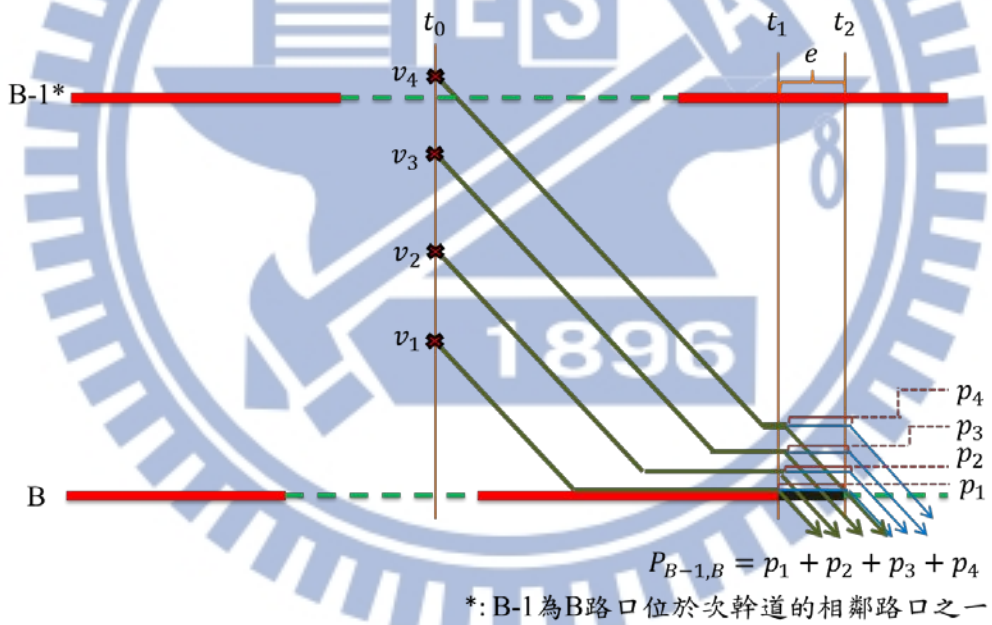
圖十八. 雙向車流於延長帶寬獲益示意圖

另一方面，在主幹道將一部分側向道路綠燈時間作為延長綠燈時間使用期間，本來在側向道路停滯之車輛將延長其等待時間，而隨著時間增加，依然陸續會有車輛到達該路口，同時增加等待通行之車輛數目，因此我們需要對延長時間伴隨的懲罰現象一併考慮。

以圖十九側向號誌規畫為例， t_0 為幹道決策時間點，且主幹道預定在 t_2 延長一綠燈時間 e 直到時間點 t_3 ，亦即側向道路將在 t_2 延長一紅燈時間 e 。此時側向道路有一車輛 v_1 將在時間點 t_1 抵達B路口，我們將以 t_1 為基礎決定該車輛因主幹道延長綠燈時間的產生之延滯時間 p_1 ；若 t_1 在 t_2 之前($t_1 < t_2$)，則 $p_1 = e$ （即 $p_1 = t_3 - t_2$ ），若 t_1 落在延長紅燈時間 e 之間($t_1 \geq t_2$)，則 $p_1 = t_3 - t_1$ ；同樣的，我們可以將所有同向受延長策略影響之停等車輛累計得到懲罰時間 $P_{B-1,B}$ ，如圖二十所示，有四輛車 v_1, v_2, v_3 與 v_4 ，共懲罰時間 $P_{B-1,B} = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$ 。

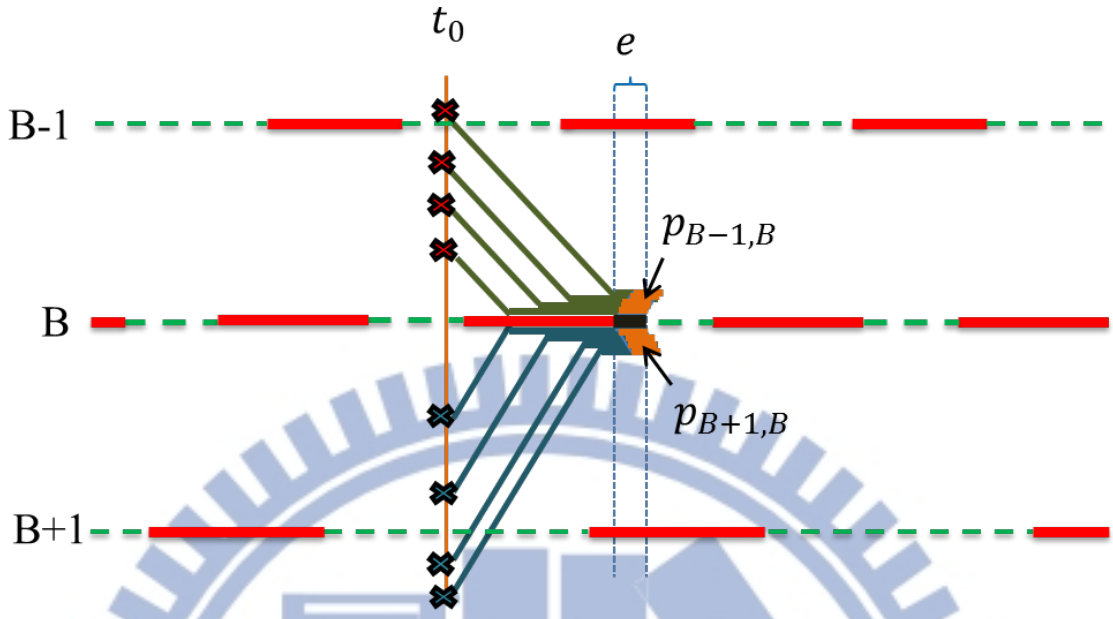


圖十九. 車輛因延長綠燈帶寬產生延滯示意圖



圖二十. 同向車輛於延長帶寬懲罰示意圖

同樣的，對於另一側向相鄰路口，我們也累計延長策略產生之延滯時間，最後結果即為主幹道延長綠燈帶寬策略下的總負效益值 $TP = p_{B-1,B} + p_{B+1,B}$ ，如圖二十一所示。



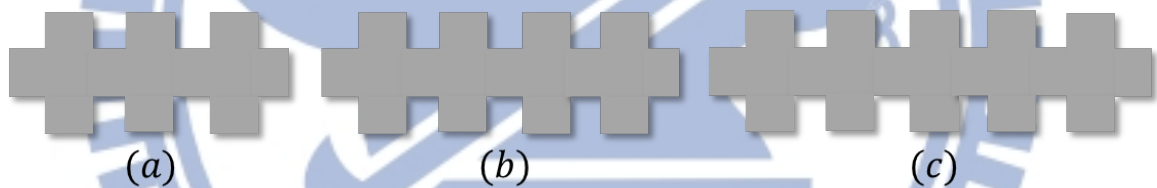
圖二十一. 雙向車流於延長帶寬懲罰示意圖

在計算得到主幹道延長綠燈帶寬時間帶來的總體獲益TW以及總體懲罰時間TP之後，我們計算其總體效益 $TB = TW - TP$ ，若總效益TB為正值，則代表此延長策略對於整體幹道是有正面效益的，我們將其綠燈帶寬延長e，否則，我們維持既定號誌規劃。

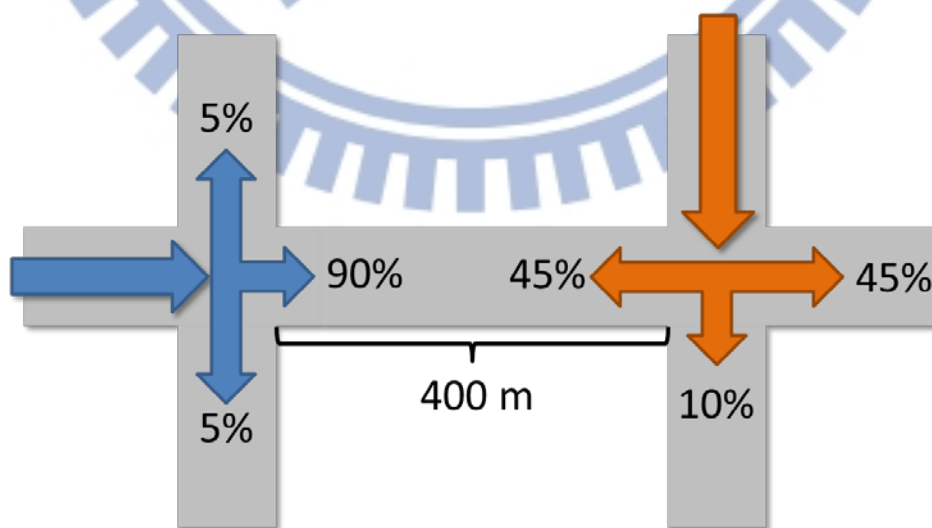
第四章、模型建置與模擬

4.1 模擬環境

我們以 Synchro 7.1 尋找綠燈帶寬並得到預定執行的交通號誌策略，之後以 Netlogo 5.0 建置模擬環境。針對主幹線，我們考慮三種連續路口(3,4,5 個)[23]，如圖二十二所示。其中，東西向為我們預設之幹道方向，南北向為次幹道；如圖二十三所示，兩相鄰路口長度為固定 400 公尺雙線道，主幹道車流的直行比率為 90%，左右轉比率分別為 5%，而次幹道車流直行比率為 10%，由次幹道車流左右轉進入主幹道的比率分別為 45%，所有車輛最高速限為時速 50 公里，其模擬時間為軟體時間 1 個星期。



圖二十二. 模擬路口數 (a) 三個連續路口 (b) 四個連續路口 (c) 五個連續路口



圖二十三. 模擬環境部分參數設置

主幹道車流量以國際上統計的三種常見流量[32]：平均到達率 3938 輛/小時、2674 輛/小時以及 1496 輛/小時，作為壅塞、一般以及離峰車流量，次幹道車流量平均到達率為 360 輛/小時，而車輛到達方式服從普瓦松分布。

4.2 效能分析與模擬結果

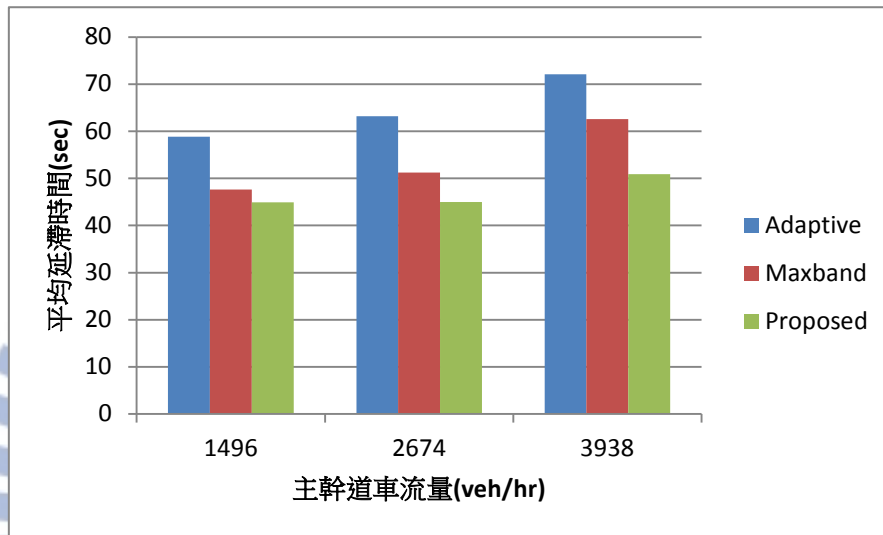
本研究以三種號誌控制方法進行模擬，分別是 Adaptive 獨立路口控制[33]、Maxband[19]綠燈帶寬連鎖號誌控制以及本研究所提出之綠燈延長策略，以下分別針對整個系統車輛平均延滯時間、主幹道車輛平均延滯時間、次幹道車輛平均延滯時間的模擬結果進行分析以及整個系統車輛平均停等次數。

1. 整個系統車輛平均延滯時間

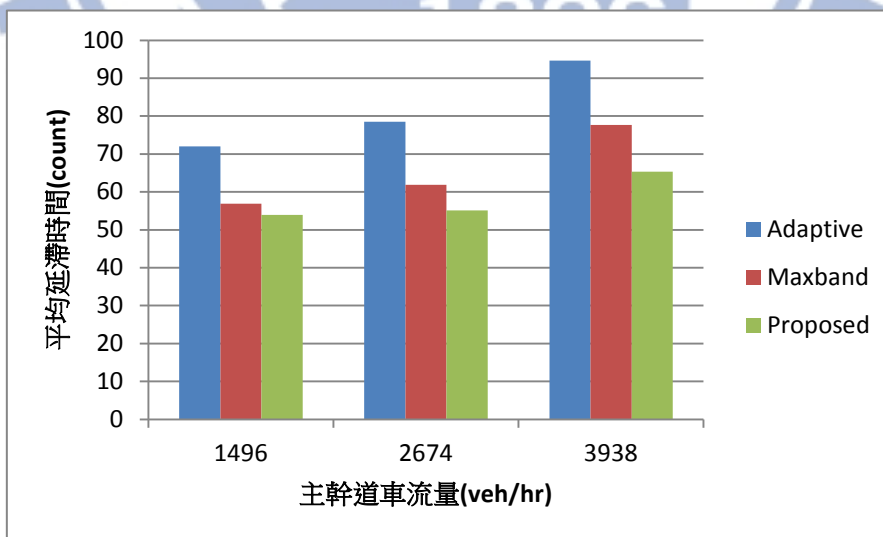
圖二十四、二十五以及二十六分別為三至五個連續路口之整體車輛平均延滯時間的模擬結果。以圖二十四之三個連續路口模擬結果為例，在每小時 1496、2674 以及 3938 三種主幹道車流量下，本研究相對於獨立路口改善程度分別為 23.8%、28.8%以及 29.4%，另一方面，也進一步改善 Maxband 平均延滯時間 5.9%、12.1% 以及 18.7%，顯示本研究提出的改進策略有效降低該系統的總延滯時間，且效果隨著主幹道流量的增加更為顯著。同樣的，以圖二十五之四個連續路口在同樣三種主幹道流量之模擬結果為例，本研究相對於獨立路口分別有 25.1%、29.0%以及 30.9% 的改善程度、相對於 Maxband 有 5.2%、10.9%以及 15.9%的改善程度；而以圖二十六之五個連續路口模擬結果為例，本研究相對於獨立路口分別有 25.7%、30.1%以及 31.7%改善程度、相對於 Maxband 有 3.3%、7.1%以及 10.6%的改善程度。

從模擬結果可以看見，在相同連續路口數中，隨著主幹道流量的增加，本研究相較於其他兩種控制方法有更明顯的改善程度；在不同連續路口數之間，由於隨著路口數增加，滯留系統中之車輛將增多，在獨立路口控制方法沒有考慮相鄰路口號誌下，其車輛延滯時間相對於連鎖控制增幅程度較為快速，使得本研究隨著連續路

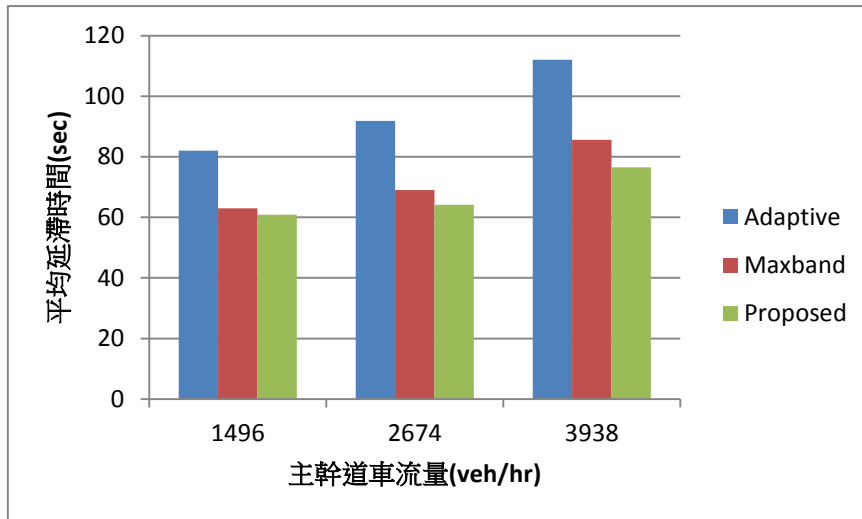
口數增加下，對於獨立路口控制有更明顯的改善；另一方面，在路口數增加下，最長可延長綠燈時間相對減少(因協調之路口數增多)，因此將稍微降低對於 Maxband 改善程度。由於三至五個路口之模擬結果趨勢相近，因此，我們之後選擇以四個連續路口進行說明分析。



圖二十四. 三個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間



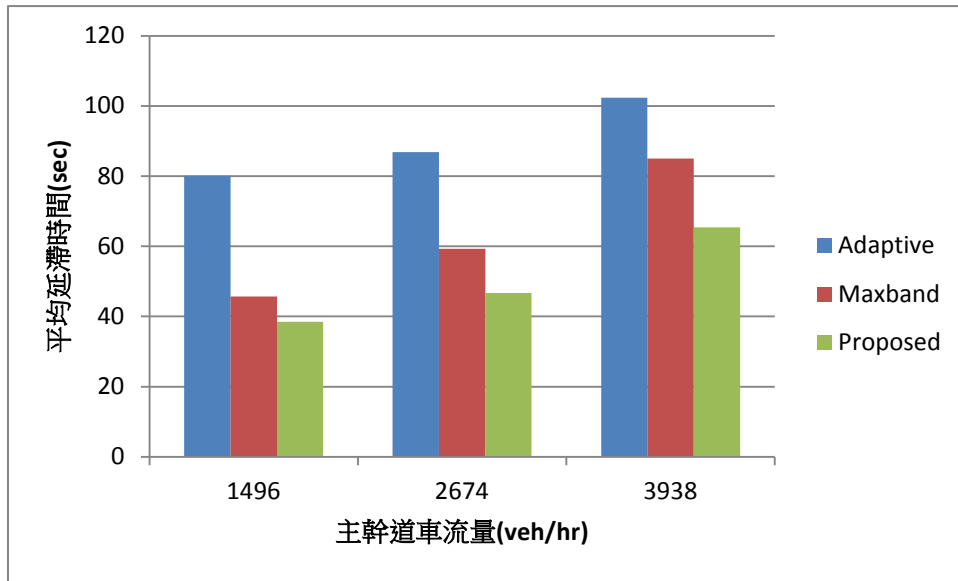
圖二十五. 四個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間



圖二十六. 五個連續路口之在三種流量下之各模型車輛平均延滯時間

2. 主幹道車輛平均延滯時間

圖二十八為主幹道車輛均延滯時間，其收集資訊為主幹道駛進與主幹道駛離、行駛途中不轉向之直行車輛。從三種不同流量觀察可見，獨立路口的主幹道平均延滯時間皆遠高於總體平均延滯時間，可見其延滯時間主要來自於主幹道直行延滯車輛；而 Maxband 連鎖號誌與本研究延長策略的主幹道平均延滯時間皆小於或約等於總體平均延滯時間，其總體延滯時間主要來自其餘時向之延滯車輛(次幹道車輛以及主幹道左右轉向車輛)。本研究延長策略相對於獨立路口的主幹道車輛平均延滯時間減少 36%~60%，效果尤為顯著，相對於 Maxband 也減少 9%~27% 的主幹道車輛平均延滯時間。



圖二十七. 四個路口之主幹道車輛平均延滯時間

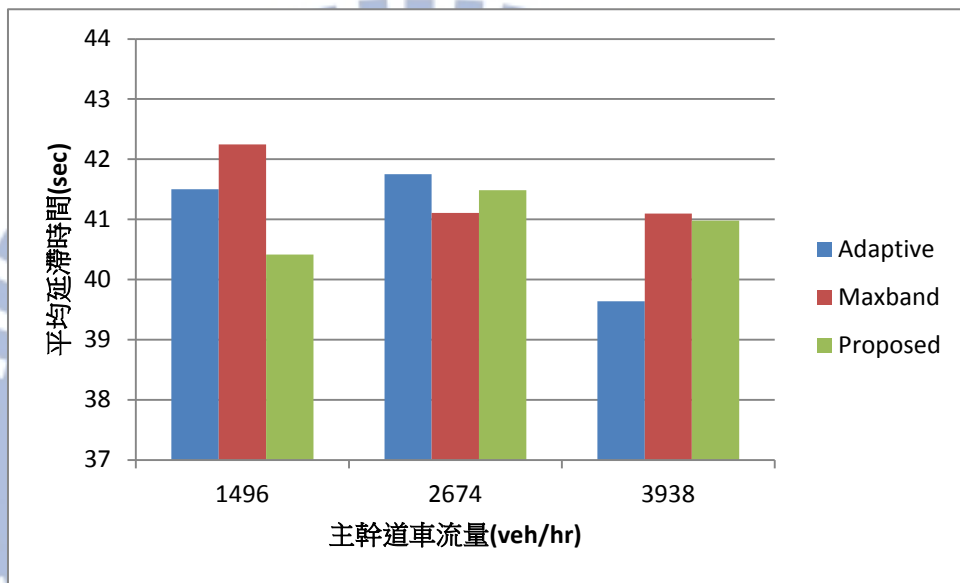
3. 次幹道車輛平均延滯時間

圖二十九為次幹道平均延滯時間，其收集之車輛資訊為次幹道駛進與次幹道駛離、途中不轉向之車輛，由於次幹道車流量較小，相對於整個系統之車輛平均延滯時間，次幹道直行的車輛產生之平均延滯時間明顯較低，且其到達車輛相較離散，因此對於次幹道延滯時間有輕微程度的擾動產生，但此現象在各流量的不同控制方法之間，擾動程度皆不到5%。本研究雖然只針對幹道方向進行綠燈延長，但由於我們在策略上同時考慮主、次幹道車輛造成的影響，因此與另外兩種控制方法相比之下，在次幹道造成的平均延誤時間均不高於2秒，對於次幹道之影響並不顯著。

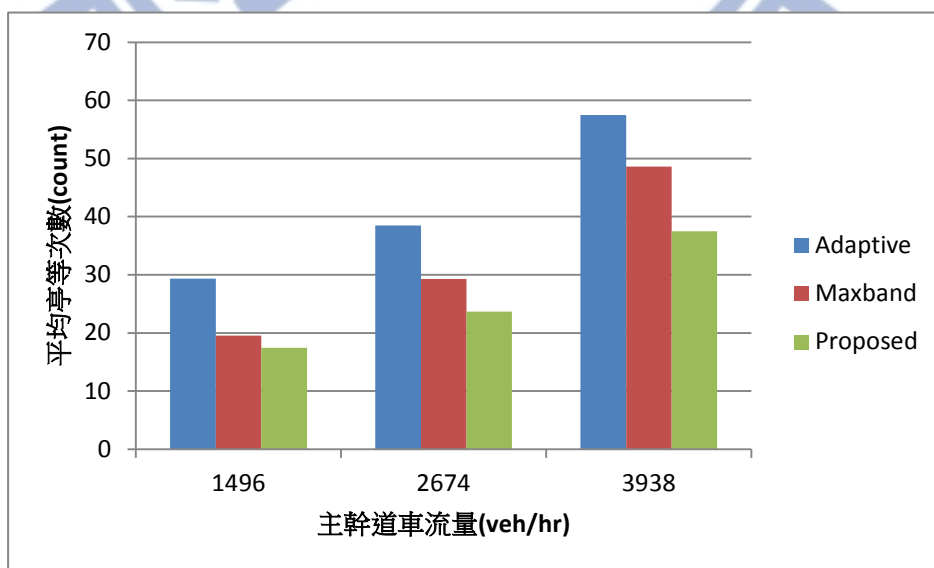
4. 整個系統車輛平均停等次數

圖二十七為整體系統的車輛平均停等次數，從模擬結果可觀察到，獨立路口因沒有考慮相鄰路口，平均停等次數為三種控制方法最高者，本研究在三種流量之下，相對於獨立路口之停等次數改善程度分別為40.4%、38.4%以及34.7%，由於獨立路口號誌控制隨著車流量變化調整，因此稍微增加通過路口車輛、減少了停等次數，

但是車輛在路口之間的停等，依然佔了大部分比例；另一方面，Maxband 相對於獨立路口控制減少了整體車輛在路口之間的停等次數，但本研究延長策略的號誌變換頻率少於 Maxband，因此相對於停等次數有更進一步之改善，在三種不同流量之下，停等次數改善程度分別為 10.5%、19.0%以及 22.8%，其隨著主幹道車流量增加，其效益越趨明顯。



圖二十八. 四個路口之次幹道車輛平均延滯時間



圖二十九. 四個連續路口之整體車輛平均停等次數

第五章、 結論與未來展望

5.1 結論

本論文針對連鎖路口提出一套即時性的交通號誌控制系統，本研究模擬結果顯示行駛在該系統的車輛總延遲時間與連續通行路口的能力獲得有效改善。

藉由智慧型運輸系統，使得系統能即時獲得路網上的車速與車流量等資訊，配合本研究提出的延長策略，以最小化整體系統延遲時間為目標，決定是否施行延長策略，即時針對路網狀況改變號誌控制，並能夠保持預定最大綠燈帶寬號誌規劃。

在單一路口之 adaptive 控制下，主幹道車輛平均延遲時間明顯高於整體平均延遲時間，顯示無連鎖號誌控制，使得車流易於路口之間停等與停滯；在 maxband 連鎖號誌控制下，車輛總延遲能有效降低，同時車流能獲得更高通行連續路口的機會；利用連鎖號誌控制結合本研究提出的延長策略，使得車輛在路口之間的延遲與停等次數皆能獲得進一步改善。

從模擬結果來看，除了對幹道施行連鎖控制規劃，即時性考慮延長號誌時向，顯著地改善路網車流狀況。

5.2 未來展望

根據本論文所提出之系統，可以導入對於特殊車輛控制，如公車、消防車、救護車…等，作為具備優先權的連鎖號誌系統。

幹道系統作為子路網之一，大部分車輛可以獲得效益並快速通過該系統，但相鄰子路網有可能因為無法消化此系統帶來的流量產生更嚴重的延滯，因此，幹道系統與其他相鄰系統之間的協調也是改善路網的重要目標之一。

參考文獻

- [1] ITS Taiwan website, [Online]. Available: <http://www.its-taiwan.org.tw/>.
- [2] S. H. An, B. H. Lee and D. R. Shin, "A Survey of Intelligent Transportation Systems," *The 3rd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems & Networks. CICSyN'11*, Bali, 26-28 July 2011, pp. 332-337.
- [3] D. Zhao, Y. Dai and Z. Zhang, "Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control. A Survey," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C. TSMCC'11*, vol. 42, no. 4, pp. 485-494, July 2012.
- [4] M. Estrada, C. Trapote, M. Roca-Riu and F. Robusté, "Improving Bus Travel Times with Passive Traffic Signal Coordination", *Transportation Research Record*, vol. 2, no.2111, pp. 68-75, 2007.
- [5] N.A. Chaudhary, V.G. Kowali, S.M. Alam. "Guidelines for Selecting Signal Timing Software," *Texas Transportation Institute. TRIS'02*, Alexandria, USA, Product 04020-P2. Sep. 2002.
- [6] A. Kouvelas, K. Aboudolas, M. Papageorgiou and E. B. Kosmatopoulos, "A hybrid strategy for real-time traffic signal control of urban road networks," in *Proc. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 884-894, Sept. 2011.
- [7] F. Yan, M. Dridi and A. El-Moudni, "A branch and bound algorithm for new traffic signal control system of an isolated intersection," *39th International Conference on Computers & Industrial Engineering. CIE39'09*, Troyes, 6-9 July 2009, pp. 999-1004.

- [8] Y. Dai and D. Zhao, "A Traffic Signal Control Algorithm for Isolated Intersections based on Adaptive Dynamic Programming," *International Conference on Networking, Sensing and Control. ICNSC'10*, Chicago, IL, 10-12 April 2010, pp. 255-260
- [9] S. Li, "A Survey of Urban Traffic Coordination Controls in Intelligent Transportation Systems," *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. SOLI'12*, Suzhou, 8-10 July 2012, pp. 177-182.
- [10] X. K. Yang, "Comparison among Computer Packages in Providing Timing Plans for Iowa Arterial in Lawrence, Kansas", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No. 4, 2001, pp. 311-318.
- [11] Trafficware, [Online]. Available: <http://www.trafficware.com/>
- [12] NetLogo Home Page, [Online]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [13] F. V. Webster, "*Traffic Signal Settings*," Road Research Technical Paper No. 39. London: Great Britain Road Research Laboratory, 1958.
- [14] F. V. Webster and B. M. Cobbe, "*Traffic signals*," Road Research technical paper. H. M. S. O. Road Res. Lab., Berkshire, U.K., 1966.
- [15] TRB HCM Manuals Home, [Online]. Available: <http://hcm.trb.org/>.
- [16] Signal Timing Manual, [Online]. Available: <http://www.signaltiming.com/>
- [17] J. Barnes and V. Paruchuri, "Optimal Phase Ordering of Traffic Signals to reduce Stopped Delay," *IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. AINA'12*, Fukuoka, 26-29 March 2012, pp. 113-119.
- [18] T. V. Mathew, *Traffic Engineering*, Bombay: Indian Institute of Technology, 2013.
- [19] S. Lu, X. Liu and S. Dai, "Revised MAXBAND Model for Bandwidth Optimization of Traffic Flow Dispersion," *ISECS International Colloquium on*

Computing, Communication, Control, and Management. CCCM'08, vol. 2, Guangzhou, 3-4 Aug. 2008, pp. 85-89.

- [20] J. Wu, N. Liu, E. Xing and X. Zhao, "Optimal Design for Traffic Light and Simulation based on MATLAB," *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. MACE'10*, Wuhan, 26-28 June 2010, pp. 2854-2857.
- [21] N. Ma; C. F. Shao and Y. Zhao, "Study on Coordination Control with Bandwidth Optimization for Signalized Intersections in Arterial Systems," *International Conference on Optoelectronics and Image Processing. ICOIP'10*, Vol. 2, Haiko, 11-12 Nov. 2010, pp. 425 - 430.
- [22] Y. GU, L. Yu, "Study on Optimization of Phase Offset at Adjacent Intersections," *International Journal of Intelligent Systems and Applications. IJISA'10*, vol. 2, no. 1, pp. 30-36, 2009.
- [23] T. Y. Hu, H. Y. Huang, Y. H. Hsu and T. Y. Wu, "Signal-Coordination Improvement Strategies for Urban Traffic Networks," *Transportation Planning Journal*, Vol. 39, No. 3, pp. 323, Sep. 2010.
- [24] S. Wang, J. Xu, G. Yang and C. Chen, "A Green Wave Band Model Considering Variable Queue Clearance Time," *10th World Congress on Intelligent Control and Automation. WCICA'12*, Beijing, 6-8 July 2012, pp. 3025-3030.
- [25] D. I. Robertson and D. Bretherton. "Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time – The SCOOT Method," *IEEE Transaction on vehicular technology*, vol. 40, no.1, pp. 11-15, Feb. 1991.
- [26] Z. M. Chen, "Intelligent traffic control central system of Beijing-SCOOT," *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. MACE'10*, Wuhan, CHINA, 26-28 June 2010, pp. 5067-5069.

- [27] SCOOT - The World's Leading Adaptive Traffic Control System. Peek Traffic Limited, Siemens Traffic Controls and TRL Limited. www.scoot-utc.com/index.php. Accessed July 1, 2013.
- [28] B. Gao, *SCATS Adaptive Traffic Control System Introduction*, Arizona:USA, 2011
- [29] SCATS - The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS) is an innovative computerised high-tech traffic management system developed and maintained by Roads and Maritime Services. www.scats.com.au/index.html. Accessed July 1, 2013.
- [30] A. G. Sims and K. W. Dobinson, "The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System Philosophy and Benefits," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 130-137, May. 1980.
- [31] Z. Tian, and F. Ohene, "Tricks and Tips about Signal Timing and Coordination," *6th International Conference of Traffic and Transportation Studies Congress. ICTTS'08*, Nanning, CHINA, 5-7 Aug. 2008, pp. 66-74.
- [32] R. P. Roess, E. S. Prassas and W. R. McShane, *Traffic Engineering*, 4th ed. United States of America: Pearson Education, 2010.
- [33] L. Ponlathep, "A simple adaptive signal control algorithm for isolated intersections using time-space diagrams," *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. ITSC'10*, Funchal, 19-22 Sept. 2010, pp.273-278.